

新日鐵(株)第1技術研究所 ○沢田郁夫, 大橋徹郎
 第3技術研究所 梶岡博幸
 広畑製鐵所 梅沢一誠
 堺製鐵所 有馬慶治

1. 緒言 溶鉄, 溶鋼の精錬処理を効率的に行うために粉体や酸素ガスのインジェクション処理が行われているが, 実操業におけるスラグ, メタルの反応を定量的に説明するためにはいくつかの課題が残されている。本報は, インジェクション処理時の反応を熱力学的平衡及び移動速度の知見に基づき考察するものである。

インジェクション処理時のスラグ, メタルの各成分濃度の推移は, 熱力学的平衡値と反応速度により決定される。移動現象としては浮上中粒子とメタルとの反応, 浮上後スラグとメタルとの反応とに大別されるが, その寄与効果は反応器の種類(取鍋, トピードカー, 転炉)や装置の大きさ等により異なる。そこで, 普遍的な解析を行うために, 流体力学モデルと多成分系の競合反応モデルを確立し, 二, 三の実機操業データを解析した。

2. 流体力学モデル Spaldingらにより開発された三次元熱流体解析プログラムを用いて①, ②式で表わされる二相流¹⁾方程式($k-\epsilon$ 乱流モデル)の数値解を求めた。

$$\frac{\partial}{\partial t} (R_i \rho_i \phi) + \text{div} (R_i \rho_i \vec{U} \phi - R_i \Gamma \text{grad} \phi) = S \phi \quad \text{①}$$

$$\sum_{i=1}^2 R_i = 1 \quad \text{②}$$

$$(\phi = 1, U_i, V_i, W_i, k, \epsilon)$$

水モデルの浴流動の測定値と本モデルの計算値との良い一致を確認したうえで, 6 t規模の取鍋における浸漬ランスからのガスインジェクション攪拌時の浴流動を三次元的に計算したのがFig-1, 2である。また, 計算に用いた操業の諸元をTable-1に示した。本モデルでは, メタル流速, ガス流速, 攪拌強度(乱流エネルギー消散速度), ガスホールドアップ等の浴内分布を計算することが可能である。火点付近で生成される F_eO 粒子がメタルに同伴されて浮上していくと仮定すると F_eO 粒子の浴内滞留時間は0.18(sec)で程度であることがわかった。今後, 火点近傍の粒子及びガス気泡の状態, 挙動等の検討が必要である。

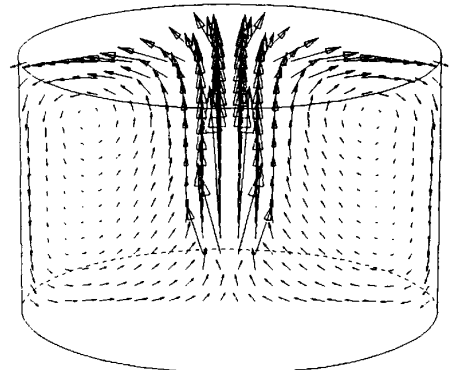


Fig.1 Calculated distribution of fluid flow velocity

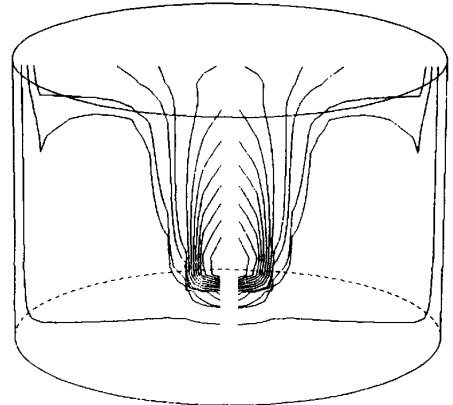


Fig.2 Calculated distribution of turbulent energy dissipation rate

3. 競合反応モデル 大口らの競合反応モデル^{3),4)}を浮上中のインジェクション粒子と浮上後スラグの各々に適用し, 上記の粒子滞留時間の知見と併せてインジェクション反応を総合的に解析するモデルを開発した。本報では溶鉄の脱 S_i インジェクション処理に適用したものについて述べる。基礎式は以下の③~⑫式よりなる。

$$J_X = k'_X (\% \underline{X}^b - \% \underline{X}^*) \\ = k'_{XO_n} ((\% \underline{XO}_n)^* - (\% \underline{XO}_n)^b) \quad \text{③}$$

$$(X = S_i, M_n, T_i)$$

Table 1 Conditions in the injection run at Hirohata Works

| | |
|--------------------------|--------------------|
| Bath diameter | 120 (cm) |
| Bath depth | 80 (cm) |
| O ₂ flow rate | 750 (Nℓ/min. hole) |
| N ₂ flow rate | 240 (Nℓ/min. hole) |
| Injection lance | 4.0 mm φ x 4 holes |

$$J_{Fe} = k'_{FeO} ((\%F_eO)^* - (\%F_eO)^b) \quad (4)$$

$$J_C = k'_C (\%C^b - \%C^*) = G_{CO} (P_{CO}^* / P_1 - 1) \quad (5)$$

$$J_O = k'_O (\%O^b - \%O^*) \quad (6)$$

$$k'_i = k_i \rho / (100 M_i) \quad (7)$$

$$K'_X = \frac{(\%XO_n)^*}{\%X^* \cdot a_{O\%}^{*n}} = \frac{100 C_t \cdot M_{XO_n} \cdot f_X \cdot K_X}{\rho_S \cdot \gamma_{XO_n}} \quad (8)$$

$$K'_{Fe} = \frac{(\%F_eO)^*}{a_{O\%}^*} = \frac{100 C_t \cdot M_{FeO} \cdot a_{Fe} \cdot K_{Fe}}{\rho_S \cdot \gamma_{FeO}} \quad (9)$$

$$K'_C = \frac{P_{CO}^*}{\%C^* \cdot a_{O\%}^*} = f_C \cdot K_C \quad (10)$$

$$a_{O\%}^* = f_O \cdot \%O^* \quad (11)$$

$$\Sigma (n \cdot J_X) + J_{Fe} + J_C - J_O = 0 \quad (12)$$

上記の式を連立して解くことにより、Fig-3に示されるような競合反応系のスラグ、メタル、界面の各成分濃度及び酸素ポテンシャル $a_{O\%}^*$ の経時変化を計算することができる。尚、上記式中の添字 $b, *$ は各々、バルク、界面を意味する。

3. 実機データの解析

以上のような流体力学モデル及び競合反応モデルを用いて広畑製鐵所における6 t 規模取鍋での気酸インジェクション脱S_i処理の解析を行い、結果の一例をFig-4に示した。平衡定数 K'_{Si} , K'_{Mn} , K'_{Fe} , K'_C については、篠崎ら⁵⁾, 水渡ら⁶⁾, 大口らの報告を参考にして以下のように決定した。

$$K'_{Si} = 10^{11} \quad K'_{Fe} = 500$$

$$K'_C = 2000 \quad K'_{Mn} = 10000$$

競合反応モデルは、他成分との競合反応、境膜移動律速過程の変化、浮上中粒子の反応と浮上後スラグの反応の寄与率の効果等を総合的に考慮することができるが、Fig-4に見られる脱S_i, 脱M_n 現象を良く記述している。

Fig-5には堺製鐵所におけるトビードカーによる高速インジェクション脱S_i処理に競合反応モデルを適用した結果を示す。Tiを含む多成分系の平衡定数についてはほとんど報告されていないので、パラメータとして扱い実機操作とのフィッティングより求めたが、操作変数を変えた多くのデータを精度良く記述できることがわかった。

4. 結 言 流体力学モデル及び競合反応モデルを併用することにより、インジェクション反応を総合的、且つ普遍的に解析する手法を確立した。また、その手法の有効性を実機での溶鉄処理で確認した。

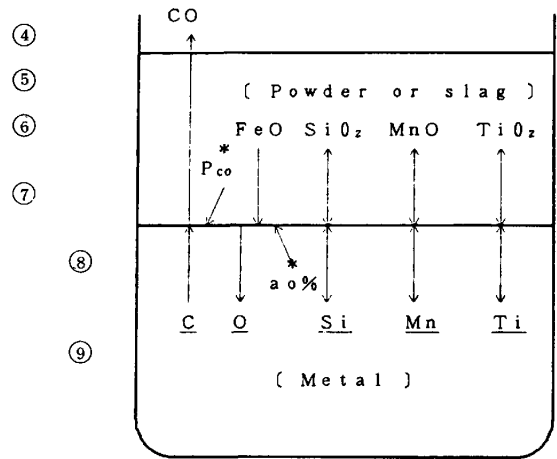


Fig.3 Reaction considered in the kinetic model

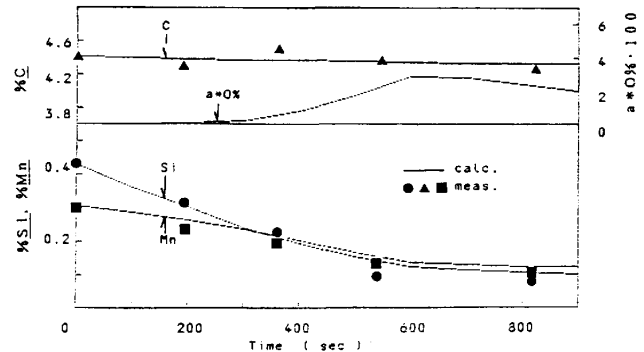


Fig.4 Simulation of the injection run in the ladle

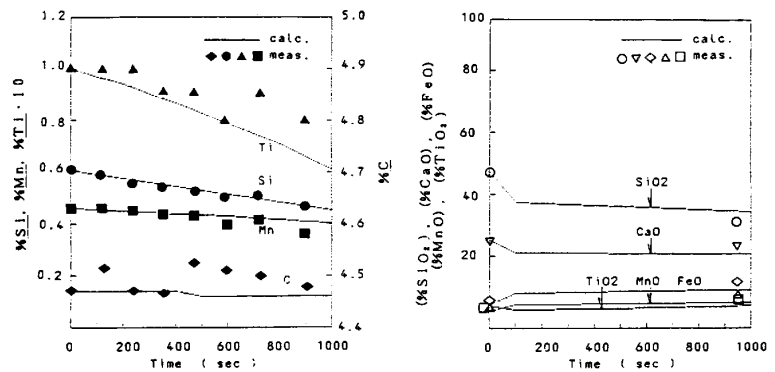


Fig.5 Simulation of the injection run in the torpedocar

5. 今後必要な検討項目

- 1) 火点近傍の浮遊粒子の大きさ, 状態, 挙動
- 2) 火点近傍のガス気泡の大きさ, 抵抗係数
- 3) スラッグの滓化状態の定量化
- 4) 多成分系スラッグ-メタルの平衡定数
- 5) スラッグ中の F_e^{2+} , F_e^{3+} の挙動の定量化

6. 記号

$a_{0\%}^*$: 界面でのヘンリー基準の酸素活量
 f_i : ヘンリー基準の活量係数
 $\% i$: メタル中 i 成分の重量百分率
 J_i : モル流束 ($\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)
 K_i : 平衡定数
 K'_i : 修正された平衡定数
 M_i : 分子量 (g/mol)
 R_i : 相分率
 U, V, W : 流速 (cm/sec)
 ρ_i : 密度 (g/cm^3)

C_t : スラッグ中の全成分モル濃度和 (mol/cm^3)
 G_{CO} : CO 気泡発生速度定数 ($\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)
 $(\% i)$: スラッグ中 i 成分の重量百分率
 k : 乱流エネルギー (cm^2/sec^2)
 k_i : 物質移動係数 (cm/sec)
 k'_i : 修正された容量係数 ($\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)
 P_{CO}^* : 界面でのCOの過飽和圧 (atm)
 $S\phi$: 生成項
 ϵ : 乱流エネルギー消散速度 (cm^2/sec^3)
 Γ : 拡散係数 (cm^2/sec)

参考文献

- 1) F.H. Harlow et al. : "Numerical Calculation of Multiphase Fluid Flow"
 J. Comp. Phys., 17 (1975), P19
- 2) 沢田ら : 鉄と鋼, 69 (1983), S241
- 3) S.Oguchi et al. : Scaninject ■ Part 1 (1983)
- 4) 大貫ら : 鉄と鋼, 69 (1983), S904
- 5) 篠崎ら : 鉄と鋼, 68 (1982), P72
- 6) 水渡ら : 鉄と鋼, 70 (1984), P675
- 7) 茨城ら : 鉄と鋼, 69 (1983), S895